

МРНТИ 44.33.31, 29.15.19, 29.15.53, 27.35.33, 27.35.30, 38.33.15

Краткий обзор ядерно-физических решений ториевого реактора в странах-производителях

З. Инсепов^{1,2*}, А.А. Калыбай¹, Ж. Алсар¹, А. Хасанейн², Ю. Сизюк², З.А. Мансуров³

¹Частное учреждение "Nazarbayev University Research Administration", Nazarbayev University,
пр. Кабанбай батыра, 53, Астана, Казахстан

²Школа ядерной инженерии, Purdue University, West Lafayette, IN, США

³Казахский национальный университет имени аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан

АННОТАЦИЯ

Современные ядерные системы используют торий в качестве топлива для реактора на расплавленных солях (MSR), усовершенствованного тяжеловодного реактора (AHWR), высокотемпературных реакторов (HTR), а также торий рассматривается в качестве топлива для инновационной системы с ускорителем (ADS). Модульная конструкция предусматривает реакторы с электрической мощностью от 100 до 3000 МВт. Представлен краткий обзор использования тория в ядерных реакторах и топливных циклах с акцентом на усовершенствованный малый реактор с водой под давлением (Advanced PWR). Существует значительный стратегический интерес к интеграции атомной промышленности с окружающей средой, экономии ограниченных топливных ресурсов, удовлетворению постоянно растущего энергетического спроса, стратегическим энергетическим резервам и вкладу электроэнергии в электрификацию сельских районов. Атомные электростанции способствуют экологически безопасному национальному развитию, поскольку они выделяют углекислый газ и оксиды азота. Более того, потенциальные риски нехватки электроэнергии из-за погодных и климатических факторов могут быть сведены к минимуму, поскольку атомные электростанции не зависят от сезона. Это позволяет беспрепятственно вести сельскохозяйственную и ирригационную деятельность, достигая запланированных урожаев.

Ключевые слова: торий, реакторы и топливные циклы, усовершенствованные большие и малые реакторы с водой под давлением (pressurized water reactors - PWR), реактор на жидком фториде тория

1. Введение

Растущий интерес к повсеместному возрождению и дальнейшей интеграции атомной промышленности в экономику различных стран мира обусловлен ее особой стратегической значимостью. Атомные станции играют ключевую роль в решении глобальных экологических задач, сохранении ограниченных запасов ископаемого топлива, поиске устойчивых источников энергии для удовлетворения энергетического спроса, а также в обеспечении энергобезопасности и электрификации сельских районов. Атомная энергетика рассматривается как единственная реальная возможность на пути к прогрессу в преодолении проблем голода, перенаселения и нехватки воды в будущем [1].

*Ответственный автор
E-mail: zinsepov@purdue.edu

Атомные электростанции способствуют экологически безопасному национальному развитию, поскольку исключают выбросы углекислого газа и оксидов азота, которые являются прямыми продуктами электростанций, работающих на ископаемом топливе [2]. Более того, потенциальные риски из-за нехватки электроэнергии могут быть уменьшены, так как атомные электростанции независимы от доступных гидроисточников энергии для каждого сезона, что не ограничивает сельскохозяйственную и ирригационную деятельность.

Первый действующий экспериментальный ториевый реактор функционировал в национальной лаборатории Оак-Ридж (США) с 1965 года, обеспечивая выработку электроэнергии в течение как минимум пяти лет с использованием ториевого бридера. С 1960-х годов Индия активно разрабатывает тяжеловодные реакторы, адаптированные под использование тория, с акцентом

на замкнутый топливный цикл и переработку отработанного топлива. Учеными были разработаны улучшенные топливные схемы с использованием смешанных оксидов тория и обогащенного урана, плутония или их смесей, а также открытые циклы с ториевыми стержнями. Экспериментально подтверждена возможность эффективного воспроизводства делящегося материала в присутствии графитового отражателя с коэффициентами воспроизводства выше 1,05. Наибольший интерес к ториевым технологиям проявляют развивающиеся страны, в частности, Аргентина, Бразилия, Китай и Индия. Индия, обладающая наиболее продолжительной историей исследований в этой области, инициировала амбициозную программу перехода к ториевому топливному циклу с использованием ^{233}U , получаемого в рамках действующей программы Pu-Th. Использование тория представляет широкие возможности как для повышения эффективности традиционных реакторов, так и для разработки новых систем, включая быстрые реакторы и ускорительные установки. Для промышленной реализации ториевого цикла необходимо не только развитие технологий, но и создание нормативной базы, подготовка кадров, обеспечение общественной поддержки и активное международное сотрудничество. В этом контексте актуальна инициатива по созданию международного научного консорциума, ориентированного на исследования и внедрение ториевых технологий [3-6].

Исследования в области ториевых реакторов вызывают повышенный интерес в научном сообществе за счет того, что, во-первых, по прогнозам мировые запасы уранового топлива закончатся через несколько десятков лет, максимум 200 лет. Во-вторых, добыча тория совершается с использованием более дешевых технологий, щадящих окружающую среду, чем при добыче урана. Кроме того, важное свойство тория состоит в том, что он не может быть сырьем для ядерного оружия. Ториевый реактор безопасен настолько, что реакторы возможно располагать в черте города [1]. В данной статье представлен краткий обзор инновационных разработок будущего ториевого реактора для получения безопасной и дешевой электроэнергии.

2. Текущие исследования и разработки

Некоторые страны, приступая к промышленному внедрению атомной энергетики, предпочитают использовать альтернативу, получившую

промышленное освоение широким фронтом, в то время как разработка модернизированных реакторных технологий с использованием ториевой топливной базы требует огромных ресурсов, большого количества научных и производственных кадров, проведения обширных научных и промышленных экспериментов. Поэтому выбор приемлемого ядерно-физического решения во многом основывается на текущей ситуации в ядерной отрасли с учетом государственной политики в области развития энергетики. При этом целесообразно проводить критический анализ конструкций ториевых реакторов и ядерно-физических решений в странах и регионах, где изготавливаются и включаются в энергосистему существующие реакторы. Новые идеи представлены в докладах на научно-технических конференциях, ежегодно проводимых в ведущих мировых атомных организациях [7].

Теория долгосрочного использования ресурсов Шеффлера в отношении экономически и промышленно дискретных территорий и государств, имеющих ограниченные возможности из-за нехватки источников природных ресурсов, но промышленно развитых и занимающих высокий уровень жизни, не только научно-технически компетентных, но и обладающих высокой дисциплиной населения, отдает приоритет разработке самоподдерживающегося топливного цикла для тепловых реакторов поколения III+. Для стимулирования энергетических инноваций ведущие ядерные державы, стремясь к диверсификации топливных ресурсов, строят экспериментальные ториевые GCR и GFR технологии бридеров в дополнение к урановым.

3. Историческое развитие ториевых реакторов в Норвегии

Норвежские инвестиции в ядерную энергетику были особенно интенсивными в конце 1970-х и начале 1980-х годов, когда было создано в общей сложности шесть экспериментальных реакторов. Целью было построить тепловой реактор в диапазоне 100-2000 МВт, в то время как обсуждения в основном касались влияния на общественное мнение. Следовательно, интересно пролить свет на общую общественную попытку создать ядерную энергетику в Норвегии, уделяя особое внимание планам и созданию двух прототипов норвежских реакторов Halden и Kjeller. Из восьми промышленно развитых стран с ядерной энергетикой в Европе Норвегия и Ирландия имели элек-

троснабжение, связанное с нынешними членами ЕС, и отсутствие взаимосвязанных энергосетей было указано в качестве одной из двух причин строительства объекта в диапазоне 100-2000 МВт, поскольку спрос на тепло в Норвегии отличался от норвежской модели. Норвегия особенно выделялась своей попыткой создать национальное производство плутониевого топлива, материалов и оружия. Самым обсуждаемым случаем был вопрос создания ядерной энергетики в Норвегии с использованием реакторов Halden и Kjeller в качестве прототипов для электростанций LWR.

В то время как общая долгосрочная амбиция была больше похожа на то, чтобы иметь американские реакторы в Норвегии. Оглядываясь назад, причины выбора LWR, в отличие, например, от CANDU, по-видимому, заключаются в отсутствии хорошей аргументации и хорошей подготовки [7].

4. Программы ториевых реакторов в Канаде

Торий является воспроизводящим материалом, который может быть преобразован в делящийся (сам по себе или преобразующийся в делящиеся изотопы под воздействием нейтронов) топливный материал. Было проанализировано влияние реакторного плутония на нейтронно-физические характеристики реакторов CANDU, работающих с двумя различными ториевыми топливными циклами. Для анализа рассматривались два реактора типа CANDU, CANDU-6 и его улучшенная версия CANDU-9. Реакторный плутоний может быть использован в качестве бустерного делящегося топливного материала в виде смешанного топлива $\text{ThO}_2/\text{PuO}_2$ в топливной связке CANDU для обеспечения критичности реактора. Для исследований были выбраны два различных состава топлива: 96% тория (ThO_2) + 4% PuO_2 и 91% ThO_2 + 5% UO_2 + 4% PuO_2 . Около 204-300 т UO_2 загружалось в активную зону каждого реактора в качестве обычной делящейся заправки для запуска работы реактора и достижения требуемой начальной реактивности. После этого затравленные топливные пучки использовались в качестве целевых для PuO_2 . Обедненный диоксид урана (обедненный UO_2) был выбран в качестве фертильного целевого материала из-за его совместности с конструкцией топливных пучков CANDU.

Компания MDS Nordion, поставщик медицинских изотопов в Канаде, которой требуется ядерный реактор, изучает возможность объединения усилий с AECL для продвижения нового строи-

тельства в Chalk River (Чок-Ривер). В дополнение к этим рыночным силам, другие заинтересованные стороны из атомной промышленности в настоящее время переживают памятные моменты с AECL, такие как Bruce Power (Брюс Пауэр), который участвует в реконструкции самого мощного реактора Онтарио, к которому должен присоединиться его близнец, ожидая решения некоторых вопросов и одобрения владельцев акций OPG [8].

5. Программы ториевых реакторов в Индии

Индия, которая не является участником NNPT, в апреле 1974 года уже использовала плутоний (^{239}Pu), выделенный из отработанного топлива испытательного реактора, поставляемого иностранными партнерами, в своем испытании атомного оружия. Ее первым испытанием атомного оружия была старая бомба без термоядерного усиления, в которой, возможно, использовалось около 5 кг ^{239}Pu . Количество оружейного Pu , которое использовалось в активной зоне, составляло около 200 г. С тех пор известно, что Индия имеет запасы плутония с повышенной радиохимической чистотой в металле или в сплаве (^{239}Pu , чистота 90% или более, остальное – ^{240}Pu , ^{241}Pu и Am), который, как полагают, необходим для ядерного оружия.

Известно, что MSBR генерирует оружейный ^{233}U , но не известно ни об одном испытании ядерного оружия с использованием $^{233}\text{U}+^{233}\text{U}$ или $^{233}\text{U}+^{239}\text{Pu}$. Однако у Индии имеются крупные программы по разработке топлива из урана-233 с топливом из тория и плутония-239 в качестве бланкета для быстрых реакторов-размножителей [8]. Проект MSBR был предварительно изучен доктором Хоми Бхабха, создателем индийской ядерной программы, который сформулировал трехэтапную ядерно-энергетическую программу Индии для обеспечения долгосрочной энергетической независимости страны.

Значительная часть ожидаемых новых ядерных программ во всем мире будет использовать системы на основе тория [9, 10]. Компании, выступающие за системы на основе ториевого топлива, утверждают, что некоторые страны, включая Индию, Россию, США, уже инициировали такие программы и разработали ториевое топливо, которое будет загружено в новые спроектированные ядерные реакторы в ближайшем будущем. В 2006 году 16 реакторов общей мощностью 2880 МВт (3 реактора по 440 МВт и 13 реакторов по 220 МВт) эксплуатировались под

гарантиями.

6. Программы ториевых реакторов в США

С момента подписания ядерного соглашения между Индией и США 2013 год был объявлен «годом ядерной сделки», но это описание не отражает соответствующей действительности. Для Индии первоначальный оптимизм, связанный с новыми технологиями и ожидаемым ростом внутренних инвестиций в ядерную отрасль, оказался в значительной степени нереализованным. В последние годы возродился интерес к реакторам, таким как реакторы лаборатории Амсдена или «Pebble Bed» 1975 (PBMR-1975) и 2005 (PBMR-2005), «Высокотемпературному газоохлаждаемому реактору» (HTGR) и конструкции «Molten Salt», поскольку появились новые данные о преимуществах ядерной физики, связанных с конструкциями «шестого поколения». Реакторы Amsden PBMR-2005, HTGR и Molten Salt оцениваются с помощью ядерно-физических процедур DA и AR. Следуя тем же процедурам, GE-14 ESBWR-PRISM и PBMR-1975 оцениваются аналогично [11]. Что касается преимуществ, которые связаны только с экономическими последствиями: в США «атомная электроэнергия является экономически неконкурентоспособной с газовой электроэнергией», а реакторы Amsden Thorium Advanced Burner могут превысить стоимость топлива для гражданских энергетических проектов США и могут генерировать электроэнергию дороже, чем существующая конструкция. Недавняя переоценка спекулятивных преимуществ ядерной физики как в Великобритании, так и в США, побудила пересмотреть возможные причины, по которым многие страны теперь ищут коммерчески непроверенные проекты ториевых «расплавленных солей».

7. Программы ториевых реакторов в Японии

В 2012 году было сделано несколько заявлений о намерении построить в Японии системы, управляемые ускорителями (ADS). Уточненная оценка этих концепций представлена в работах [12, 13], где обобщены выводы по физике реакторов, тяжелым авариям, управлению реактивностью и технологии ускорителей. Концепция ADS оказалась нежизнеспособной, если планы по использованию чистого тория сохраняются. Однако она обеспечивает аналогичные возможности трансмутации и преимущества топливного цикла за счет использования ThMOX в BWR [12, 13].

8. Заключение

Развитие ториевых реакторов представляет собой перспективное направление для обеспечения устойчивой, безопасной и экономически эффективной ядерной энергетики. Топливные циклы на основе ThO₂ обладают рядом стратегических преимуществ, включая снижение радиотоксичности отходов, возможность работы в замкнутом цикле и адаптацию к существующим реакторным технологиям. Несмотря на технические и нормативные вызовы, международное сотрудничество, государственная поддержка и интеграция научных и инженерных разработок создают основу для перехода к следующему поколению ядерных установок, в которых торий может занять ключевую роль.

Благодарность

Данное исследование выполнено в рамках реализации научной программы ИРН BR24993225 по программно-целевому финансированию Комитета науки МНВО РК на 2024-2026 годы.

Список литературы

- [1]. Калыбай А.А., Курбанова Б., Мансуров З.А., Хасанейн А., Алсар Ж., Инсепов З. Математические модели активной зоны ториевого реактора // Горение и плазмохимия. – 2024. – Т. 22. – С. 279-295.
- [2]. Инсепов З., Калыбай А.А., Мансуров З.А., Лесбаев Б.Т., Хасанейн А., Алсар Ж. Ядерно-химические характеристики подкритических ториевых реакторов с внешним нейтронным источником: обзор // Горение и плазмохимия. – 2024. – Т. 22. – С. 297-308.
- [3]. Jiao G., Xia G., Wang J., Peng M. Study on the heat transfer performance of supercritical CO₂ Brayton cycle in a thorium molten salt reactor // Nuclear Engineering and Technology. – 2024. – Vol. 56. – P. 1698-1711.
- [4]. Jiao G., Xia G., Zhu H., Zhou T., Peng M. Thermal-hydraulic analysis of the molten salt reactor based on the AHTR design // Annals of Nuclear Energy. – 2023. – Vol. 192. – Art. No. 110025.
- [5]. Nuclear Energy Agency. Annual Report 2023 // OECD NEA. – 2023. – P. 1-132.
- [6]. Maiorino J.R., D'Auria F., Reza A.J. An overview of Thorium Utilization in Nuclear Reactors and Fuel Cycle // Proceedings of the 12th International Conference of the Croatian Nuclear Society. –

- Zadar, Croatia. – 2018. – June 3-6.
- [7]. Mash A., Ottenberg D.R. Status and Future Requirements for the Uranium-233 Power Reactor Program // U.S. Atomic Energy Commission, Division of Reactor Development. – 1958. – 125 p.
 - [8]. Murray C.L. India's nuclear power program: A study of India's unique approach to nuclear energy // Thesis (S.B.), Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Nuclear Science and Engineering. – 2006. – 99 p.
 - [9]. Huang J., Ding M. Analysis of thorium content and spatial separation influence for seed and blanket fuel blocks in the AHTR // Progress in Nuclear Energy. – 2016. – Vol. 90. – P. 182-189.
 - [10]. Lainetti P.E.O. Thorium and Its Future Importance for Nuclear Energy Generation // Journal of Energy and Power Engineering. – 2016. – Vol. 10. – P. 600-605.
 - [11]. World Nuclear Association. Generation IV Nuclear Reactors // WNA. – 2017. – Available at: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-powerreactors/generation-iv-nuclear-reactors.aspx>
 - [12]. Serp J., Allibert M., Bene O., Delpech S., Feynberg O., Ghetta V., Heuer D., Holcomb D., Ignatiev V., Kloosterman J.L., Luzzi L., Lucotte E., Uhlíř J., Yoshioka R., Zhimin D. The molten salt reactor (MSR) in generation IV: Overview and perspective // Progress in Nuclear Energy. – 2014. – Vol. 77. – P. 308-319.
 - [13]. D'Auria F. Nuclear fission: From E. Fermi to Adm. Rickover, to industrial exploitation, to nowadays challenges // Advances in Science, Engineering and Research. – 2019. – Vol. 4, No. 1. – P. 17-30.
 - [6]. Maiorino JR, D'Auria F, Reza AJ (2018) Proceedings of the 12th International Conference of the Croatian Nuclear Society: 3-6 June, Zadar, Croatia.
 - [7]. Mash A, Ottenberg DR (1958) Status and Future Requirements for the Uranium-233 Power Reactor Program. U.S. Atomic Energy Commission, Division of Reactor Development: 125 p. <https://doi.org/10.2172/4298255>
 - [8]. Murray CL (2006) India's nuclear power program: A study of India's unique approach to nuclear energy. Thesis (S.B.), Massachusetts Institute of Technology, Dept. Nuclear Science and Engineering: 99 p.
 - [9]. Huang J, Ding M (2016) Progress in Nuclear Energy 90:182-189. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2016.03.018>
 - [10]. Lainetti PEO (2016) Journal of Energy and Power Engineering 10:600-605. <https://doi.org/10.17265/1934-8975/2016.10.003>
 - [11]. World Nuclear Association (2017) Generation IV Nuclear Reactors. Available at: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-powerreactors/generation-iv-nuclear-reactors.aspx>
 - [12]. Serp J, Allibert M, Bene O, Delpech S, Feynberg O, Ghetta V, Heuer D, Holcomb D, Ignatiev V, Kloosterman JL, Luzzi L, Lucotte E, Uhlíř J, Yoshioka R, Zhimin D (2014) Progress in Nuclear Energy 77:308-319. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.02.014>
 - [13]. D'Auria F (2019) Advances in Science, Engineering and Research 4(1):17-30.

References

- [1]. Kalybai AA, Kurbanova B, Mansurov ZA, Hasanein A, Alsar Zh, Insepov Z (2024) Combustion and plasma chemistry 22:279-295. [https://doi.org/10.18321/cpc22\(4\)279-295](https://doi.org/10.18321/cpc22(4)279-295)
- [2]. Insepov Z, Kalybai AA, Mansurov ZA, Lesbaev BT, Hasanein A, Alsar Zh (2024) Combustion and plasma chemistry 22:297-308. [https://doi.org/10.18321/cpc22\(4\)297-308](https://doi.org/10.18321/cpc22(4)297-308)
- [3]. Jiao G, Xia G, Wang J, Peng M (2024) Nuclear Engineering and Technology 56:1698-1711. <https://doi.org/10.1016/j.net.2023.12.024>
- [4]. Jiao G, Xia G, Zhu H, Zhou T, Peng M (2023) Annals of Nuclear Energy 192:110025. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2023.110025>
- [5]. Nuclear Energy Agency (2023) Annual Report 2023. OECD NEA:1-132.

Brief overview of nuclear physics solutions for thorium reactor in producing countries

Z. Insepov^{1,2*}, A.A. Kalybay¹, J. Alsar¹, A. Hassanein², Yu. Sizyuk², Z.A. Mansurov³

¹Private Institution "Nazarbayev University Research Administration", Nazarbayev University, 53, Kabanbay Batyr ave., Astana, Kazakhstan

²School of Nuclear Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN, USA

³Al-Farabi Kazakh National University, 71 Al-Farabi ave., Almaty, Kazakhstan

ABSTRACT

Modern nuclear reactor systems use thorium as fuel for the Molten Salt Reactor (MSR), Advanced Heavy Water Reactor (AHWR), High Temperature

Reactors (HTR); and thorium is being considered as fuel for the Accelerator Driven System (ADS). The modular design provides reactors with electrical power from 100 to 3000 MW. This article will provide an overview of the use of thorium in nuclear reactors and fuel cycles with an emphasis on the Advanced Pressurized Water Reactor (PWR). There is significant strategic interest in integrating the nuclear industry with the environment, preserving limited fuel resources, providing alternatives to meet the ever-growing energy demand, serving as strategic energy reserves, and contributing to rural electrification. Nuclear power plants have the potential to contribute to environmentally friendly national development as they have zero carbon dioxide and nitrogen oxide emissions. Moreover, potential risks of power shortages due to weather and climate factors can be minimized as nuclear power plants are independent of the season. This allows agricultural and irrigation activities to continue unimpeded, thus achieving planned harvests.

Keywords: thorium, reactors and fuel cycles, improved large and small reactors with pressurized water reactors (PWR), thorium liquid fluorine reactor.

Өндіруші елдердегі торий реакторы үшін ядролық физика шешімдеріне қысқаша шолу

З. Инсепов^{1,2*}, А.А. Калыбай¹, Ж. Алсар¹,
А. Хасанейн², Ю. Сизюк², З.А. Мансуров³

"Nazarbayev University Research Administration" жеке мекемесі, Nazarbayev University, Қабанбай батыр даңғылы, 53, Астана, Қазақстан

²Ядролық инженерия мектебі, Purdue University, West Lafayette, IN, USA

³Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Әл-Фараби даңғылы, 71, Алматы, Қазақстан

АҢДАТПА

Қазіргі заманғы ядролық реакторлық жүйелер балқытылған тұз реакторы (MSR), кеңейтілген

ауыр су реакторы (AHWR), жоғары температура реакторлары (HTR) үшін отын ретінде торийді пайдаланады; ал торий үдеткіш жүйесі (ADS) үшін отын ретінде қарастырылуда. Модульдік конструкция реакторларды 100-ден 3000 МВт-қа дейінгі электр қуатымен қамтамасыз етеді. Бұл мақалада Жетілдірілген қысымды су реакторына (PWR) баса назар аудара отырып, ядролық реакторлар мен отын циклдарында торийдің қолданылуына шолу жасалады. Атом өнеркәсібін қоршаған ортамен біріктіруге, шектеулі отын ресурстарын сақтауға, энергияға үнемі өсіп келе жатқан сұранысты қанағаттандыруға балама ұсынуға, энергияның стратегиялық қоры ретінде қызмет етуге және ауылды электрлендіруге үлес қосуға маңызды стратегиялық қызығушылық бар. Атом электр станцияларының экологиялық таза ұлттық дамуға үлес қосу мүмкіндігі бар, өйткені оларда көмірқышқыл газы мен азот оксиді шығарындылары нөлге тең. Сонымен қатар, ауа-райы мен климаттық факторларға байланысты қуат тапшылығының ықтимал тәуекелдерін азайтуға болады, өйткені атом электр станциялары маусымға тәуелсіз. Бұл ауылшаруашылық және суару жұмыстарын кедергісіз жалғастыруға, осылайша жоспарланған өнімге қол жеткізуге мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: торий, реакторлар және отын циклдары, жетілдірілген үлкен және кіші қысымды су реакторлары (PWR), сұйық фторидті торий реакторы.